

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

THE STUDY OF THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF TEFLON

А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.)

Россия, Магнитогорск, Магнитогорский государственный технический университет им.Г.И. Носова,
455000, Челябинская обл.,
г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38. ants@mgn.ru

Abstract

In this paper we experimentally define the rheological properties of teflon coating. These data allowed the authors to obtain the equation of state of teflon and further formulate and solve the boundary value problem of evaluation of the stress-strain state of n-layer preform in the hearth at drawing to define the boundaries of sustainable drawing steel-copper-polymer composition.

Основной задачей экспериментальных исследований является оценка сопротивления деформации политетрафторэтилена (ПТФЭ) от степени и скорости деформации и вывод обобщенного уравнения состояния для данного материала.

На основании анализа существующих методов и приборов для исследования реологических характеристик политетрафторэтилена было принято решение использовать усовершенствованный кулачковый пластометр с контрольно-измерительной аппаратурой кафедры ОМД ЮУрГУ, обеспечивающий высокую точность измерений при малых нагрузках и перемещениях [1].

Суть реконструкции свелась к тому, что пластометр был оснащен датчиками и аппаратурой, позволяющей регистрировать тот уровень нагрузки, который возникает при деформации полимеров. Принципиальная схема пластометра после модернизации показана на рис.1.

При реконструкции заменен датчик перемещения в процессе загрузки на более

чувствительную балочку равного сопротивления 11; дополнительно установлен датчик перемещения при разгрузке 6; использована более чувствительная мессдоза усилия 9; облегчен верхний боек контейнера 5.

Модернизированный пластометр позволил реализовать намеченную программу исследований. Использовалась методика проведения опытов и обработки информации согласно [2]. Суть методики состоит в следующем. Профилированный кулачок пластометра моделирует во времени закон нагружения образца. В результате получают первичную информацию в виде зависимости усилия сжатия от времени. Контроль текущей высоты образца позволяет расчетным путем определить контактную площадь, среднее нормальное напряжение, а также величину и скорость деформации для любого момента времени. Вся обработка опытной информации осуществляется на ПК с фиксацией кривых зависимостей интересующих параметров от времени [2].

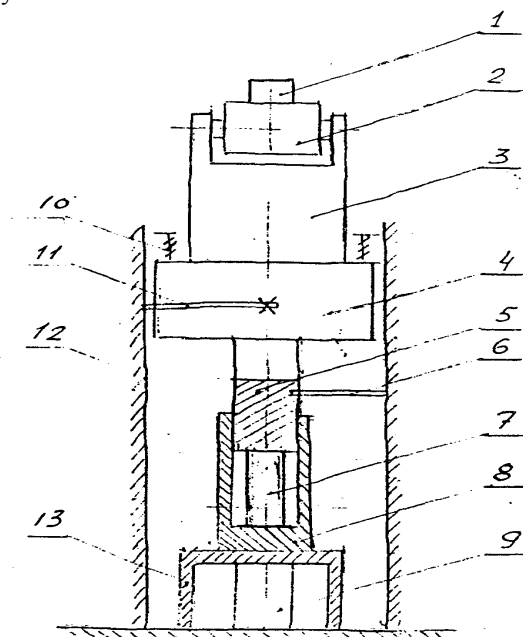


Рис. 1. Кулачковый пластометр после модернизации.

1-кулачок; 2-ролик; 3-шток; 4-боек; 5-верхний боек контейнера; 6-датчик перемещения; 7-образец; 8-корпус контейнера; 9-мессдоза усилия; 10-пружина; 11-датчик перемещения; 12-станина; 13-опора

Для получения более достоверной информации в течение всего периода нагружения были на порядок уменьшены временные интервалы регистрации параметров. Для расчета истинного среднего нормального напряжения по усилию сжатия в текущий момент времени необходимо знать площадь контакта образца с деформирующим инструментом. Непосредственный контроль площади, например, путем измерения диаметра образца в месте контакта с инструментом весьма проблематичен. В связи с этим текущую площадь

определяли из условия постоянства объема, полагая деформацию однородной (без образования бочки), а затем вносили коррекцию на бочкообразование с помощью аналитических зависимостей [2].

Характерная осциллограмма при деформации ПТФЭ-образцов на пластометре приведена на рис. 2. Для определения действительных значений усилий деформации и величины обжатия образца использовали заранее известные тарировочные графики месдоз.

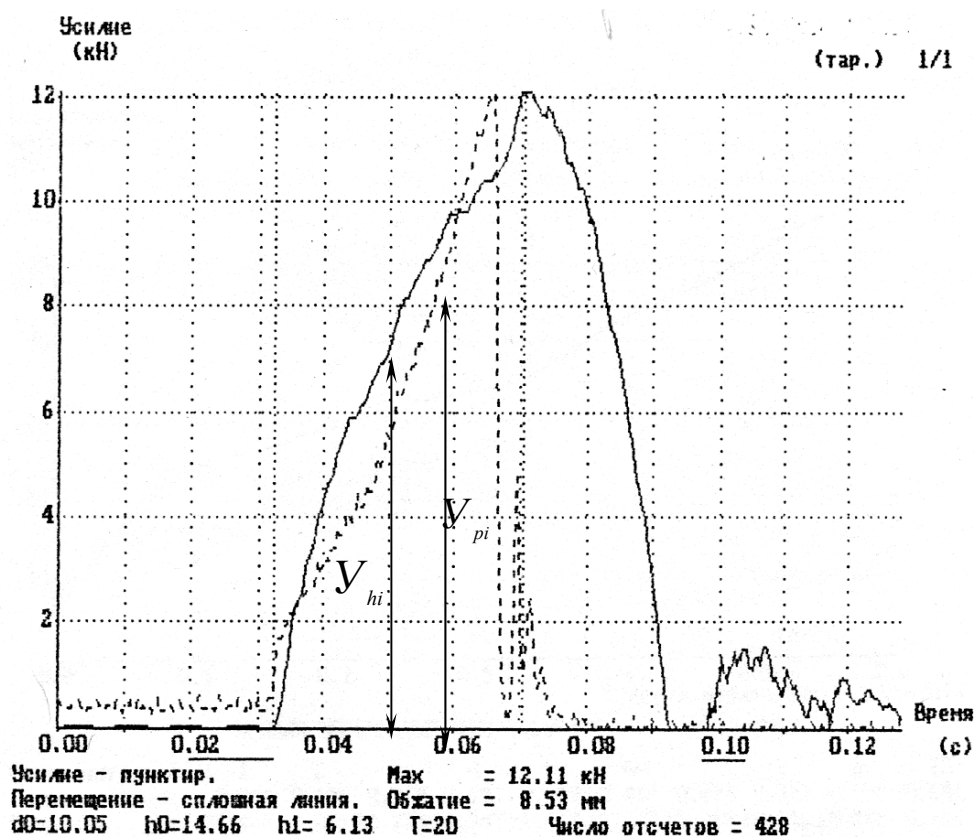


Рис.2. Типовая осциллограмма (образец №61)

Рабочий участок осциллограммы (на рис. 2 он соответствует времени испытания от ≈ 0.32 с. до ≈ 0.07 с.) разбивается вертикальными линиями на равные по времени участки $\Delta\tau$. Истинное сопротивление деформации определяется по формуле:

$$\sigma_i = \frac{P_i}{S_i} = \frac{4 \cdot Y_{pi} \cdot \mu_p \cdot h_i}{\pi \cdot d_0^2 \cdot h_0}, \quad (1)$$

где $P_i = Y_{pi} \cdot \mu_p$ - текущее усилие деформации;

$$S_i = \frac{\pi \cdot d_0^2 \cdot h_0}{4 \cdot h_i} - \text{текущая площадь поперечного}$$

сечения образца;

здесь μ_i - тарировочный коэффициент месдозы усилия;

Y_{pi} - текущая ордината кривой усилия (рис 2.).

d_0, h_0 - диаметр и высота образца до испытания;

$$h_i = h_0 - \Delta h_i = h_0 - \Delta h_i \frac{Y_{hi}}{Y_{h1}} -$$

текущая высота образца определяется из выражения, в котором Δh_i - абсолютное обжатие образца;

Y_{h1}, Y_{hi} - конечная и текущая ординаты кривой деформации (рис. 2.)

Среднее сопротивление за весь цикл деформации образца находится из выражения

$$\sigma_c = \frac{\Delta\tau \sum_{i=1}^n \sigma_{sc}}{\tau}, \quad (2)$$

где n - общее число временных интервалов;

τ , $\Delta\tau$ – полное время деформации образца и время, соответствующее каждому из n -участков, на которые разбивается осциллограмма.

Текущая степень деформации определяется следующим образом:

$$\varepsilon_i = \ln \frac{h_0}{h_i} = \ln \frac{h_0}{h_0 - \frac{\Delta h_i Y_{hi}}{Y_{h1}}} \quad (3)$$

Соответственно конечная степень деформации

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{h_0}{h_1}. \quad (4)$$

При больших обжатиях и наличии контактного трения в плоскости соприкосновения бойков и образца наблюдается бочкообразование, что свидетельствует о неоднородности напряженно-деформируемого состояния материала. С целью увеличения точности обработки пластометрических экспериментальных данных вводится поправка по [2]:

При отношении размеров образцов $d/h \leq 1$

$$\sigma_i = \frac{P_i}{S_{\max,i} \left(1 - \frac{r_{\max,i}}{4h_0}\right)}, \quad (5)$$

При $d/h > 1$

$$\sigma_i = \frac{P_i}{S_{\max,i} \left(1 - \frac{r_{\max,i}}{4h_0\rho_i} + \frac{f}{3} \frac{d_i - h_i}{h_i}\right)}, \quad (6)$$

где $S_{\max,i}$ – текущее максимальное поперечное сечение образца в месте выпучивания;

$r_{\max,i}$ – текущий радиус максимального поперечного сечения;

$$\rho_i = \frac{h_i^2}{8(r_{\max,i} - r_i)} - \text{текущий радиус}$$

кривизны бочки образца;

r_i , d_i – текущий радиус и диаметр контактной поверхности образца с бойками;

f – коэффициент трения.

Обработку результатов проводили с использованием оригинального программного продукта кафедры ОМД ЮУрГУ с расчетом величин: деформаций ε_i , скоростей деформаций U_i , сопротивления деформаций σ_i , а также средних значений U_c и σ_s за время осадки образца. По результатам экспериментальных исследований строили кривые упрочнения $\sigma_s = \varphi(\varepsilon_i)$.

Пластометрические исследования проводились на цилиндрических образцах с исходными размерами $d_0 * h_0 = 10 \text{ мм} * 15 \text{ мм}$. Температура во время испытания была постоянной и равнялась 20°C . Образцы изготавливали из материала фторопласт-4 обработкой на токарном станке. В связи с тем, что выясняли влияние на сопротивление деформации (σ_i) двух факторов: скорости (U) и степени (ε) деформации, план эксперимента был построен следующим образом. Было выбрано четыре уровня скоростей деформации $U = 5, 15, 25, 40 \text{ с}^{-1}$ (см. табл. 1), диапазон которых определили значениями скоростей, используемых на промышленных волочильных станах. Для каждого значения скорости были определены предельные значения степеней деформации $\varepsilon_{\text{пр}}$, до которых проводили по пять параллельных испытаний на сжатие с фиксацией (расчетом) текущих значений степени деформации и сопротивления деформации. Число фиксируемых во времена испытаний пар значений $\varepsilon_i - \sigma_i$ равнялось 10-ти вне зависимости от величины предельной деформации.

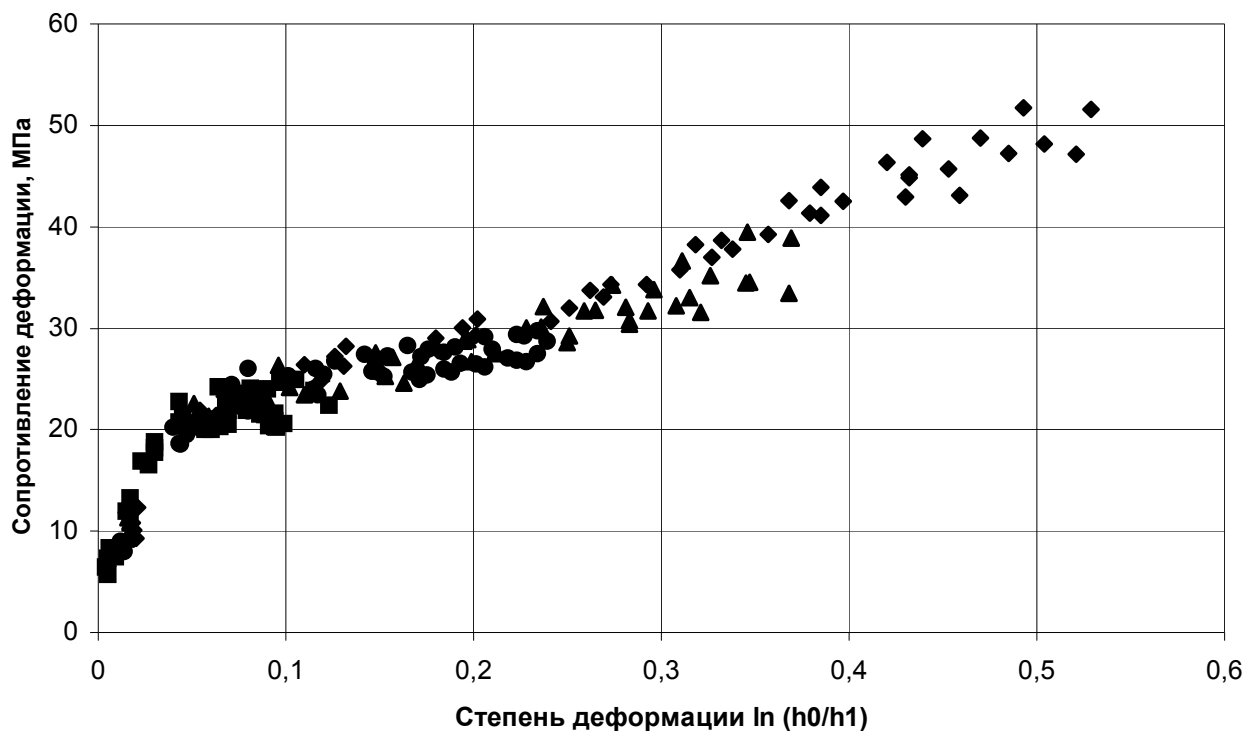
Таблица 1

План проведения эксперимента

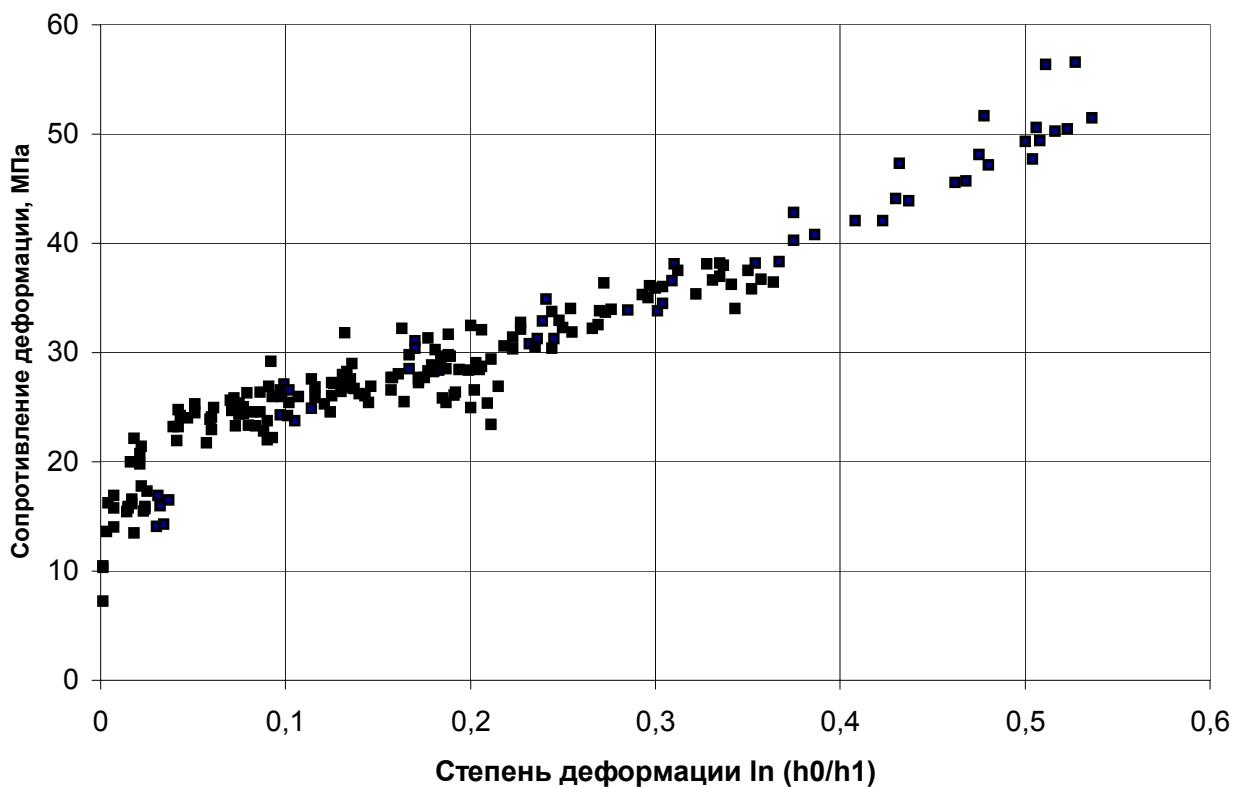
$\varepsilon_{\text{разр}}$	$U = 5 \text{ с}^{-1}$	$U = 15 \text{ с}^{-1}$	$U = 20 \text{ с}^{-1}$	$U = 25 \text{ с}^{-1}$	$U = 40 \text{ с}^{-1}$
0,1	+	+	-	-	-
0,2	+	+	-	+	-
0,3	+	+	-	+	+
0,4	+	+	-	+	+
$\varepsilon_{\text{разр}}$	-	-	+	-	-

Кроме того, для оценки пластичности материала были проведены испытания ПТФЭ образцов до разрушения на скорости 20 с^{-1} (см. табл. 1).

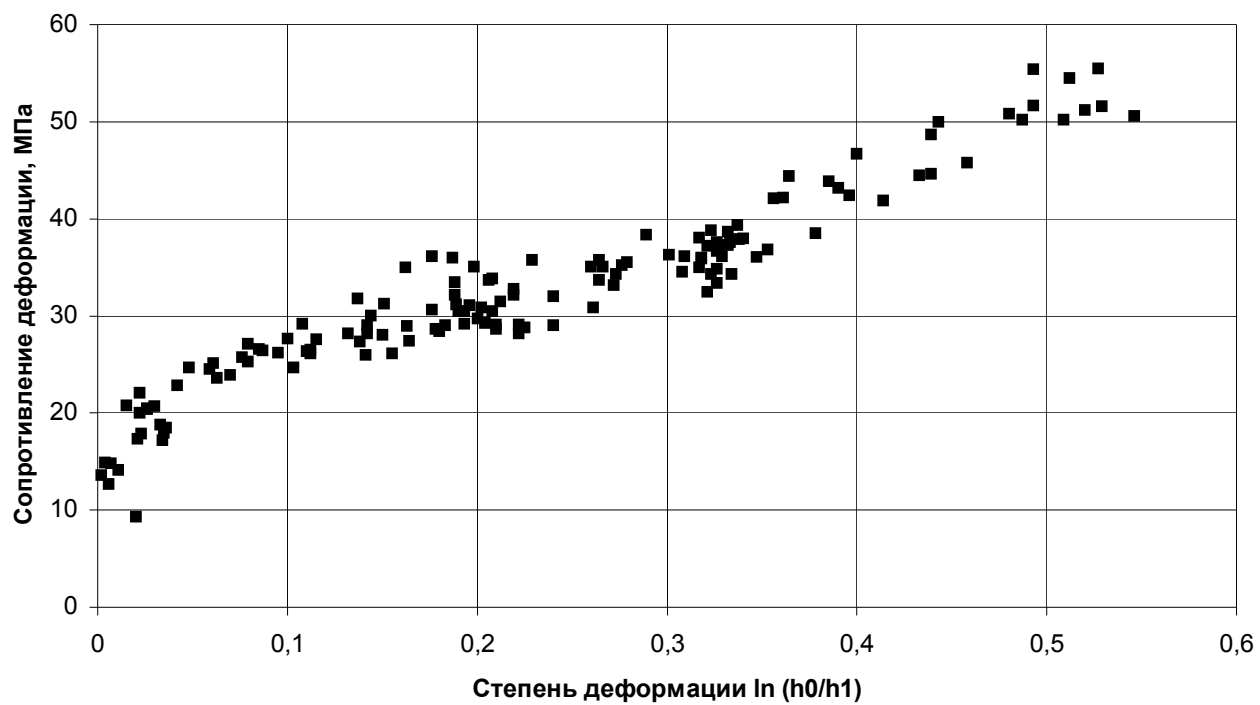
По экспериментальным точкам были построены кривые упрочнения для всех вышеописанных деформационно-скоростных условий сжатия образцов. В обобщенном виде они представлены на рис. 3.



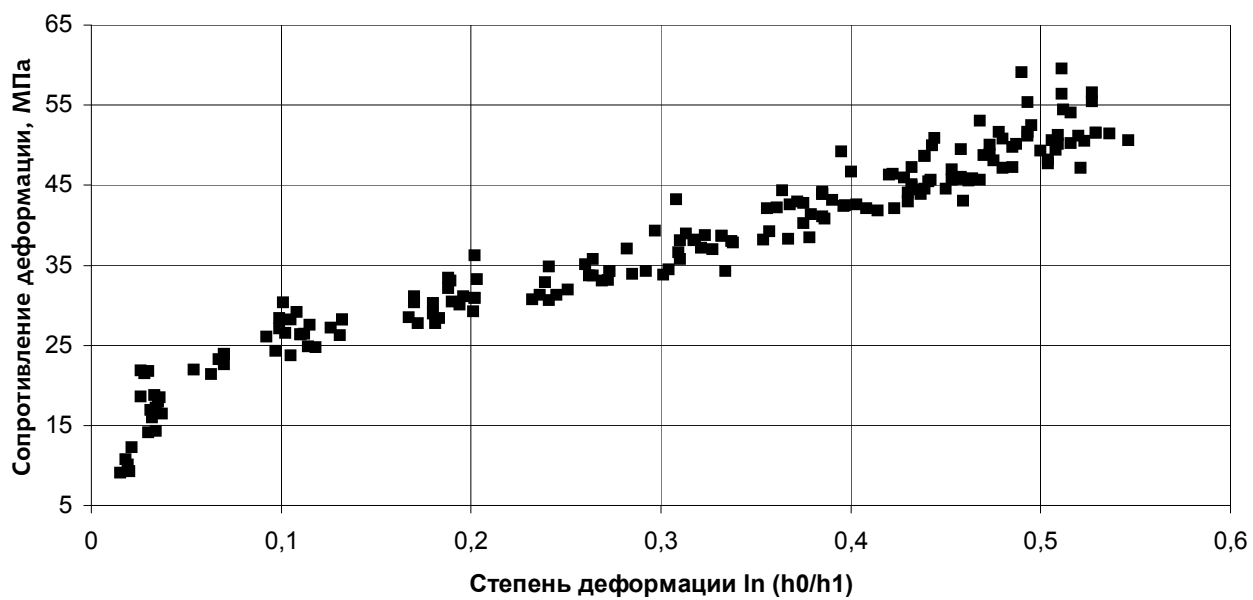
а



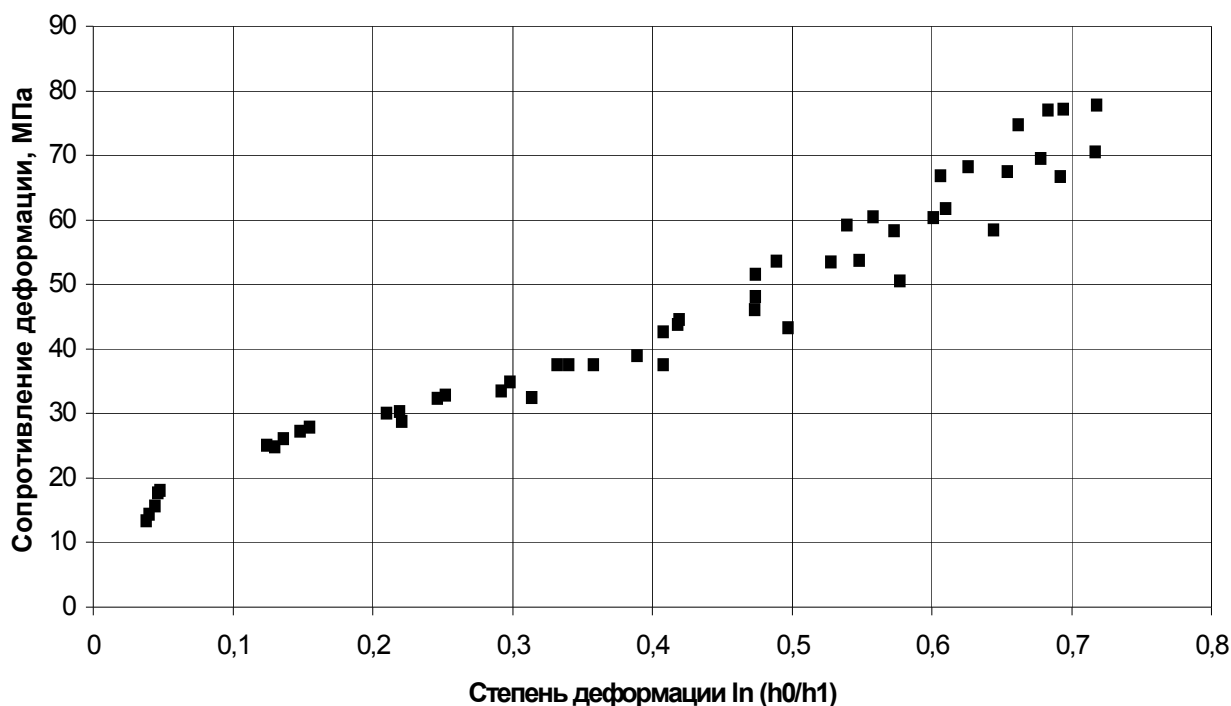
б



В



Г



д

Рис. 3. Поля экспериментальных значений ε_i - σ_i

а) - для $U=5 \text{ с}^{-1}$; б) - для $U=15 \text{ с}^{-1}$;

в) - для $U=25 \text{ с}^{-1}$; г) - для $U=40 \text{ с}^{-1}$;

д) - для $U=20 \text{ с}^{-1}$ (до разрушения).

Для решения основной задачи – вывода уравнения состояния, полученный экспериментальный материал был подвергнут обработке по следующему алгоритму:

1. Построение методом наименьших квадратов усредненных кривых $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ для каждого постоянного значения скорости деформации ($U= 5; 15; 20; 25; 40 \text{ с}^{-1}$) во всем диапазоне значений степеней деформаций до разрушения с целью определения границы упругой и пластической зон.

2. Аппроксимация усредненных кривых на участках упрочнения уравнениями вида $\sigma_i = \sigma_0 + \beta \varepsilon_i^\gamma$ и вывод единого уравнения состояния для одного значения скорости деформации.

3. Оценка влияния скорости деформации на вид и положение кривой упрочнения и вывод обобщенного уравнения состояния для политетрафторэтилена.

Реализацию алгоритма обработки покажем на примере анализа результатов, полученных при скорости сжатия ПТФЭ образцов для одного значения скорости деформации, например $U=5 \text{ с}^{-1}$.

На рис. 4 представлены усредненные кривые сжатия (диаграммы сжатия) во всем диапазоне исследованных степеней деформаций, который

разделен на четыре участка, ограниченных соответственно предельными значениями логарифмических деформаций $\varepsilon_{np1,2,3,4}=0.108, 0.22, 0.35, 0.48$ (на рис. 4 показаны пунктиром). Разделение всего диапазона на участки вызвано необходимостью более точного построения диаграммы сжатия, особенно при малых деформациях.

Для определения границы упругой области (координат точек перегиба кривых на каждом из четырех участков) воспользовались свойством монотонности непрерывной функции, а именно – равенством нулю второй производной в этой точке. В частности, на рис. 5 показан график изменения второй производной кривой сжатия на четвертом участке. Из рис. 5 видно, что координата границы зон на данном участке $\varepsilon_m=0.08$.

Координаты точек перегиба кривых на всех участках показаны во втором столбце табл. 2.

Очевидно, что координата границы зоны упругости находится в интервале $\varepsilon_m=0.044\dots 0.08$. Однако более точным следует считать значение $\varepsilon_m=0.044$, так как оно определено при более детальном рассмотрении кривой именно на первом, самом коротком участке кривой, где $\varepsilon_i=0\dots 0.108$.

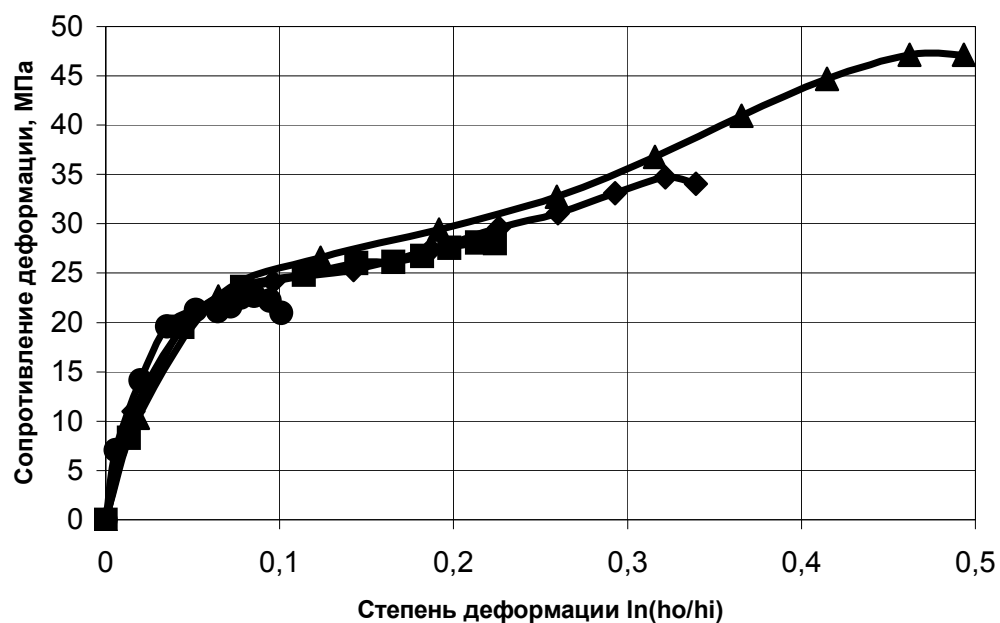


Рис.4. Усредненные кривые сжатия ПТФЭ образцов при скорости деформации 5 с^{-1} .

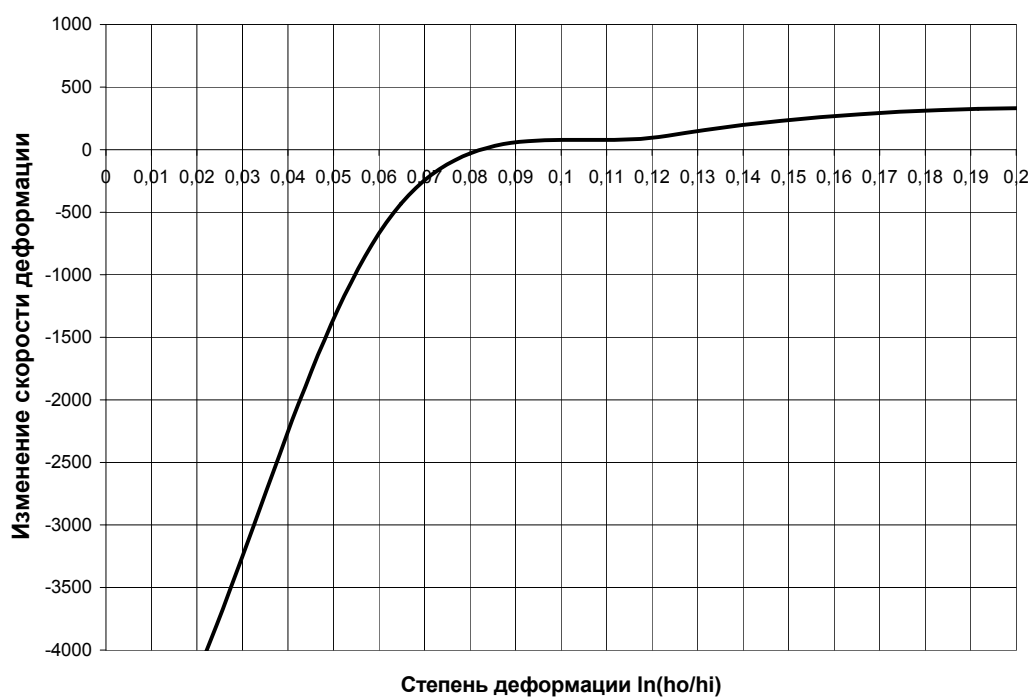


Рис. 5. Типовой график второй производной кривой сжатия на четвертом участке при деформации образца со скоростью деформации 5 с^{-1}

Таблица 2

Параметры теоретических кривых сжатия на I, II, III, IV участках

Мах степень деф., %	ε_m	$\sigma_s(\varepsilon_m)$, МПа	β	γ
10	0,044	19	68,362	1,274
20	0,075	22,5	59,664	1,533
30	0,072	22,21	68,733	1,536
40	0,08	22,78	71,813	1,42

Следуя второму этапу алгоритма, аппроксимировали полученные кривые в пластической области в виде

$$\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_m) + \beta \varepsilon_i^\gamma.$$

Неизвестные коэффициенты β и γ определяли методом наименьших квадратов после линеаризации исходного уравнения путем его логарифмирования в виде $\ln(\sigma_i - \sigma_i(\varepsilon_i)) + \beta + \gamma \ln \varepsilon_i$.

Результаты обработки показали, что значения коэффициента корреляции линейной аппроксимации для всех экспериментальных данных определены в диапазоне $R=0.9...0.95$.

Для вывода уравнения состояния при сжатии ПТФЭ образцов со скоростью деформации $U=5 \text{ с}^{-1}$, во-первых, логарифмические деформации перевели в относительные и, во-вторых, статистическую

обработку в зоне упрочнения провели, охватывая весь объем экспериментальных данных, соответствующих $U=5 \text{ с}^{-1}$.

После обработки результатов уравнение состояния для $U=5 \text{ с}^{-1}$ приняло вид:

$$\sigma_i = 20.315 + 127.053 \varepsilon^{1.63}$$

Его графическая интерпретация представлена на рис. 6.

Подобным образом по указанному алгоритму были получены уравнения состояния политетрафторэтилена для значений скоростей деформации $U=15, 25, 40 \text{ с}^{-1}$ и $U=20 \text{ с}^{-1}$ (до разрушения). Вид уравнений состояния и их параметры для различных значений скоростей деформаций сведены в таблицу 3.

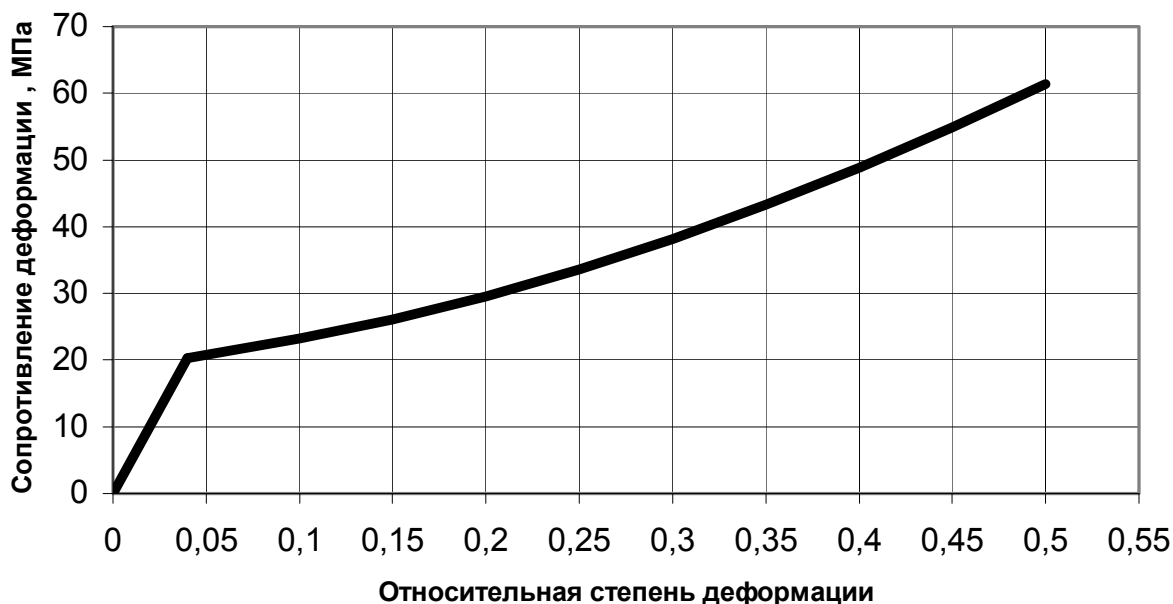


Рис. 6. Единая диаграмма сжатия политетрафторэтилена для $U=5 \text{ с}^{-1}$

Таблица 3

Параметры диаграмм сжатия для исследованных скоростей деформации

Скорость деф., U с^{-1}	ε_m	$\sigma_i(\varepsilon_m), \text{МПа}$	β	γ	Уравнения состояния
5	0,044	20,32	127,5	1,63	$\sigma_i = 20.32 + 127.5 \varepsilon^{1.63}$
15	0,037	22,24	81,21	1,37	$\sigma_i = 22.24 + 81.21 \varepsilon^{1.37}$
25	0,031	21,5	57,68	0,99	$\sigma_i = 21.5 + 57.68 \varepsilon^{0.99}$
40	0,037	23,5	89,75	1,26	$\sigma_i = 23.5 + 89.75 \varepsilon^{1.26}$
20(раз-рушение)	0,048	20	141,32	1,6	$\sigma_i = 20 + 141.32 \varepsilon^{1.6}$

На рис. 7. показана их графическая интерпретация.

Как видно из рис. 7, скорость деформации меняет поведение кривых в пластической области довольно неоднозначно, и, на первый взгляд, невозможно дать оценку этому влиянию. К тому же нет видимого проявления вязких свойств политетрафторэтилена в исследуемом диапазоне температур. Так, например, большую степень упрочнения характеризуют кривые, построенные

при скоростях деформации $U=5$ и $U=20$ с^{-1} , а наименьшую – кривые для $U=15$ и $U=25$ с^{-1} . Очевидно, что влияние скорости деформации при данном уровне температур материала неоднозначно и незначительно. Разброс значений σ_i не превышает 13% при больших степенях деформации ($\varepsilon=0.5$), а для уровня значений относительных деформаций, применяемых при волочении, ошибка определения σ_i находится в интервале 5...10%.

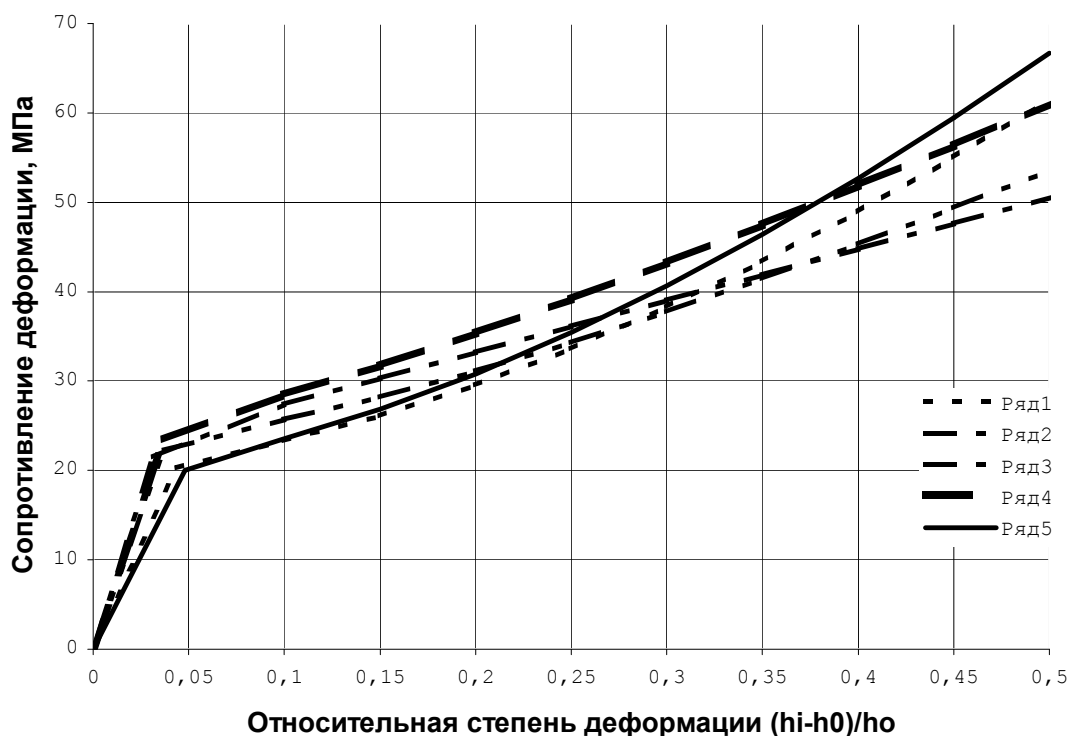


Рис. 4.7. Теоретические диаграммы сжатия политетрафторэтилена

ряд 1 – для $U=5$ с^{-1} ; ряд 2 - для $U=15$ с^{-1} ;
ряд 3 - для $U=25$ с^{-1} ; ряд 4- для $U=40$ с^{-1} ;
ряд 5 - для $U=20$ с^{-1}

Таким образом, в рамках решения задачи волочения многослойной проволоки, имеющей политетрафторэтиленовое покрытие, влиянием скорости деформации можно пренебречь, а обобщенное уравнение состояния, построенное на

базе обработки всего экспериментального материала, примет вид:

$$\sigma_i = 21.51 + 94.05 \varepsilon_i^{1,37} \quad (7)$$

В графическом виде обобщенная диаграмма сжатия представлена на рис. 8.



Рис. 8. Обобщенная диаграмма сжатия политетрафторэтилена

При необходимости проведения более точных расчетов, следует использовать уравнения, представленные в табл. 3. для требуемого значения скорости деформации.

Полученное уравнение состояния политетрафторэтилена было использовано при решении задачи аналитического моделирования процесса волочения бездефектной сталемедной проволоки с фторопластовым покрытием, путем оценки уровня внеконтактных сдвигающих напряжений на межслойных границах при волочении, что позволило разработать технологию производства подобной проволоки для контактных сетей [3].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чаплыгин Б.А. Создание прогрессивного производства вулканического инструмента на основе моделирования процессов обработки давлением, новых способов и устройств: Дис. на соиск. Уч. ст. д.т.н. / УралНИИабраз. И шлиф. – Челябинск, 1999. – 229с.
2. Крайнов В.И. Оборудование, методика, результаты пластометрических исследований: Учебное пособие. – Челябинск: ЧГТУ, 1995. – 95 с.
3. Анцупов А.В. Проектирования технологии производства сталемедной проволоки с полимерным покрытием: Монография. Магнитогорск: МГТУ им.Г.И.Носова, 2005. 130 с.